

Научная статья

УДК 621.315.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28303>



*А.М. Гулов*<sup>1</sup> ✉, *А.В. Колычев*<sup>1</sup>, *А.В. Косоруков*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> АО «Ленгидропроект», Санкт-Петербург, Россия

✉ [algu1ov@yandex.ru](mailto:algu1ov@yandex.ru)

## **ПРИМЕНЕНИЕ ОПН НА УЧАСТКАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 КВ БЕЗ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА**

*Аннотация.* Применение ОПН на воздушных линиях вместо грозозащитного троса является распространенной практикой. Опыт эксплуатации показывает, что на таких линиях увеличивается количество повреждений защитных аппаратов. Для предотвращения выхода ОПН из строя вследствие прямого удара молнии важно верно выбрать класс пропускной способности. Поэтому актуальным остается изучение энергетических характеристик ОПН. В статье рассматривается частный случай пересечения двух воздушных линий, когда с нижней линии снимается трос в пролете пересечения. На верхних фазах опор по краям пролета пересечения устанавливаются ОПН. В ходе исследования определены зависимости величины энергии, рассеиваемой ОПН, от параметров импульса тока молнии (фронт, амплитуда) и параметров ВЛ (сопротивление заземления опор, количество изоляторов в гирлянде).

*Ключевые слова:* воздушная линия, ОПН, молниезащита, АТР, энергоемкость.

*Для цитирования:*

Гулов А.М., Колычев А.В., Косоруков А.В. Влияния легирующих элементов на структуру и свойства композиционных материалов на основе алюминия с углеродными наночастицами // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28303>



A.M. Gulov<sup>1</sup> ✉, A.V. Kolychev<sup>1</sup>, A.V. Kosorukov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> JSC «Lenhydroproject», St. Petersburg, Russia

✉ [algu1ov@yandex.ru](mailto:algu1ov@yandex.ru)

## THE USE OF SURGE ARRESTERS ON SECTIONS OF 110 KV OVERHEAD LINES WITHOUT A GROUND WIRE

*Abstract.* The use of surge arresters on overhead lines instead of ground wire is a common practice. Operational experience shows that the number of damaged protective devices increases on such lines. It's important to choose the right energy discharge capability to prevent the failure of surge arresters due to a lightning strike. Therefore, the study of the energy characteristics of surge arresters remains relevant. The article considers a special case of the intersection of two overhead lines. In that situation ground wire is removed from the lower line in the intersection span. Surge arresters are installed on the upper phases in that span. The amount of surge arrester discharge energy was determined as a function of the parameters of the lightning current pulse and the parameters of the overhead line. The following values were varied: the front and amplitude of the lightning current pulse, the tower footing resistance, the number of insulators in the string.

*Keywords:* transmission line, surge arrester, lightning protection, ATP, discharge energy.

*Citation:*

A.M. Gulov, A.V. Kolychev, A.V. Kosorukov, The use of surge arresters on sections of 110 kV overhead lines without a ground wire, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 31–40, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28303>

**Введение.** Проблемы молниезащиты воздушных линий и обеспечения бесперебойной подачи электроэнергии остаются актуальными и сегодня. Одним из особенно важных вопросов является защита участка пересечения воздушных линий. Необходимо предотвратить тяжелые аварии в случае грозового перекрытия с верхней линии на нижнюю линию электропередачи. Такие перекрытия могут вызвать ложную работу релейной защиты и системные аварии, а также повреждения электрооборудования линий более низкого напряжения. Наибольшую опасность представляет удар молнии в пролет пересечения. Расстояние между проводами пересекающихся линий в этом пролете должно быть достаточно большим. Поэтому в пролете пересечения целесообразно снять грозозащитный трос с нижней линии и выбрать точку пересечения дальше от середины пролета верхней линии [1].

Чтобы компенсировать отсутствие троса в пролете пересечения на верхних фазах крайних опор пролета устанавливаются ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН). Применение ОПН в качестве альтернативного средства молниезащиты ВЛ рассматривается в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [2–7]. Возникает вопрос является ли установка ОПН на верхних фазах достаточной для обеспечения надежной работы линии. Важно выбрать ОПН достаточной энергоемкости, так как наибольшие энергетические воздействия на ОПН возникают при ударах молнии в фазные провода [8, 9]. Отсутствие грозозащитного троса на нижней линии в пролете пересечения увеличивает вероятность попадания молнии в верхний фазный провод данной ВЛ.

Наиболее тяжелым случаем с точки зрения энергетических нагрузок на ОПН будет удар молнии в фазный провод на близком расстоянии от опоры. В этом случае ток молнии будет распределяться неравномерно между ограничителями, установленными по краям пролета.

Целью исследования является определение зависимости величины энергии, рассеиваемой ОПН, от параметров импульса тока молнии и параметров ВЛ. Прежде всего будут варьироваться следующие величины: фронт и амплитуда импульса тока молнии, сопротивление заземления опор.

### Метод исследования

Расчеты энергии проводились при помощи программного комплекса АТР, в котором была составлена модель участка двухцепной ВЛ. На рис. 1 изображена схема исследуемой двухцепной ВЛ 110 кВ. Рассматривается участок линии из 4 металлических опор с пролетом длиной 300 м. Грозозащитный трос отсутствует в пролете между опорами О2 и О3. Пораженным ударом молнии считается верхний фазный провод ближе к опоре О2. В расчетах используется ОПН 3-го класса пропускной способности с удельной энергией 5,75 кДж/кВ, так как рассматривается случай, когда на ОПН оказываются наибольшие энергетические воздействия.

### Результаты

С точки зрения исследования энергоемкости ОПН наибольший интерес представляет случай прямого удара молнии в фазный провод. Величина волнового сопротивления провода значительно превосходит сопротивление заземляющего устройства опоры, поэтому при ударе молнии в фазный провод через ОПН установленный на соседней цепи ВЛ ток молнии практически не протекает. Т.е. отсутствует эффект распределения энергии между ограничителями первой и второй цепей ВЛ. На энергию, выделяемую в ОПН, прямое влияние оказывает перекрытие изоляции незащищенных фаз [10]. С точки зрения перекрытия изоляции в наибольшей опасности находятся гирлянды верхних фаз на соседних с бестросовым пролетом опорах (О1 и О4 на рис. 2). Необходимо проследить влияние электрической прочности изоляции ВЛ, поэтому расчеты проводятся для поддерживающей гирлянды из 6 изоляторов, а затем для гирлянды из 9 изоляторов.

Важным параметром при исследовании молниезащиты ВЛ является сопротивление заземления опор, чему уделено внимание в работах [11–13]. Для более наглядного сравнения влияния

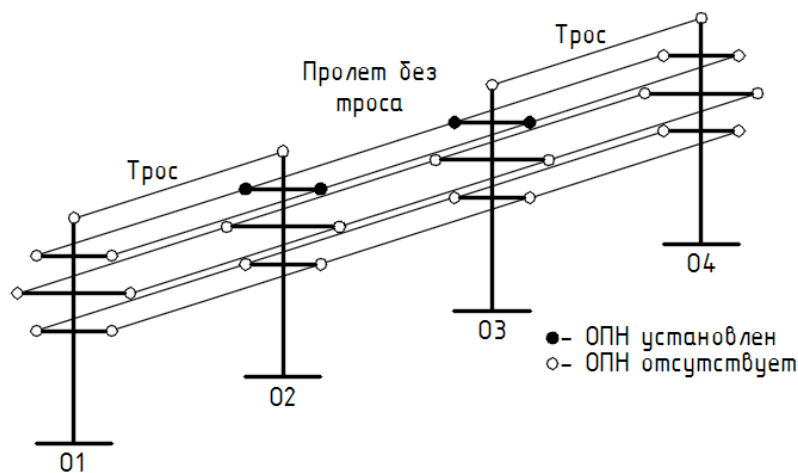
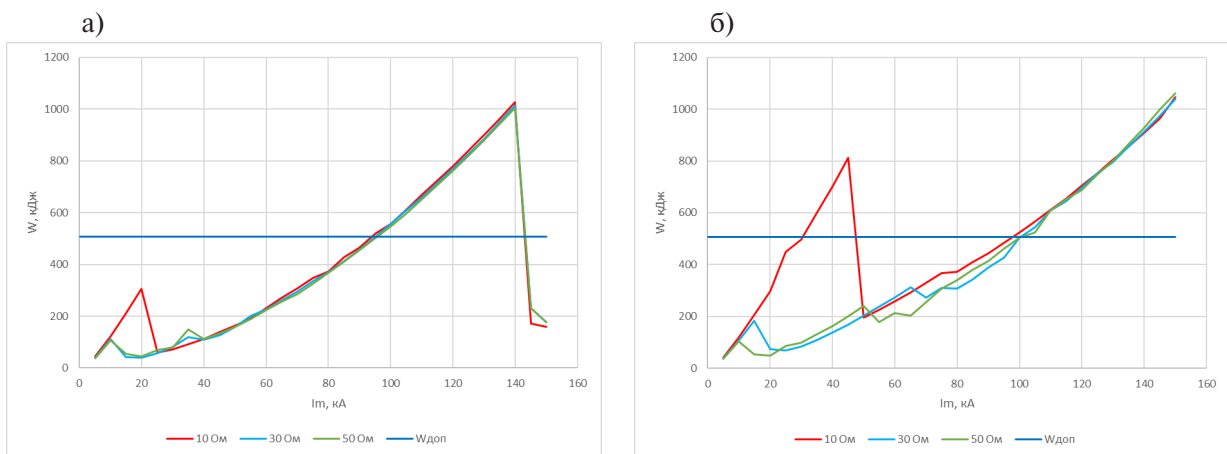


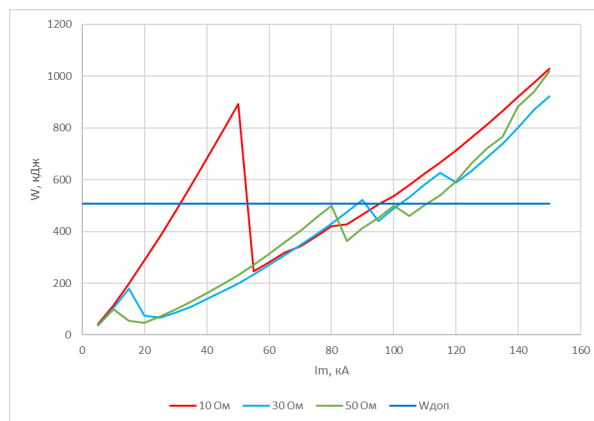
Рис. 1. Схема исследуемой ВЛ 110 кВ

Fig. 1. Model of 110 kV transmission line



Энергия через ОПН на опоре О2 для фронта 1/100 мкс

Энергия через ОПН на опоре О2 для фронта 5/100 мкс



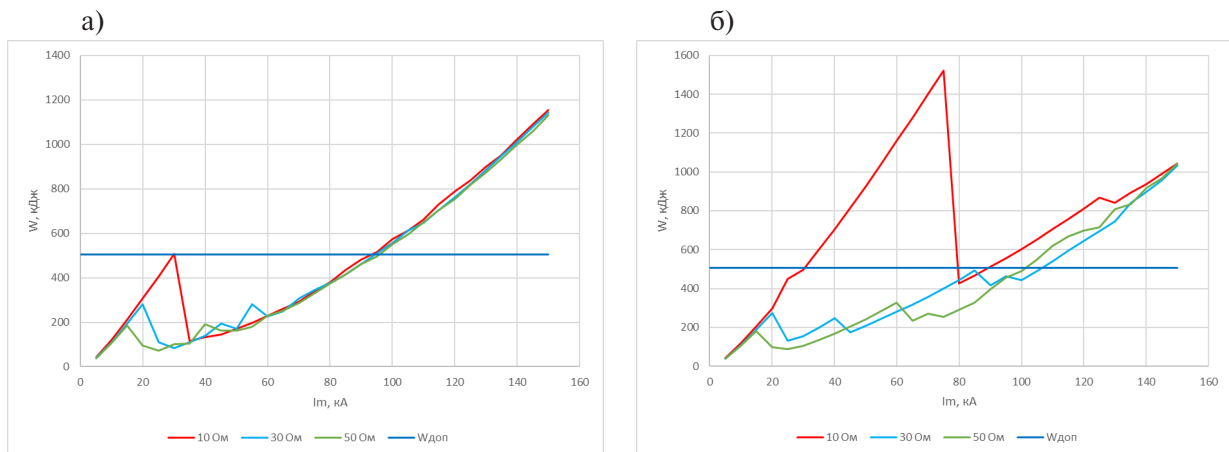
Энергия через ОПН на опоре О2 для фронта 10/100 мкс

Рис. 2. Зависимость энергии, выделяемой в ОПН на пораженной цепи, от амплитуды тока молнии  
Fig. 2. Surge arrester discharge energy as a function of the lightning current magnitude for the struck circuit

сопротивления ЗУ опор на рис. 2 представлены зависимости энергии, рассеиваемой в ОПН, для одинаковых фронтов, но разных сопротивлений ЗУ опор.

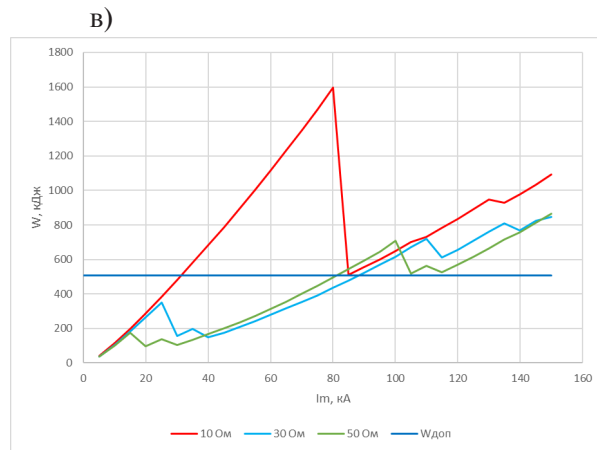
С увеличением амплитуды импульса тока молнии растет и энергия, выделяемая в ОПН. Как видно из рис. 2 для малого сопротивления заземления опор 10 Ом рост энергии имеет выраженно «зубчатый» характер, при некотором токе молнии величина энергии начинает уменьшаться. Это связано с перекрытиями изоляции ВЛ и соответствующим уменьшением энергии, выделяемой в ограничителях. При пологих фронтах (более 5 мкс) перекрытие изоляции ВЛ происходит позже, поэтому энергия успевает превысить допустимую для ОПН 3-го класса пропускной способности.

При расположении пересечения ВЛ на территориях с плохо проводящим грунтом (высокое удельное сопротивление грунта и сопротивление заземления опор) – характер роста энергии, выделяемой в ОПН, менее резкий. Это связано с перекрытиями изоляции незащищенных фаз ВЛ, которые происходят при меньших значениях амплитуды импульса тока молнии вследствие повышенного сопротивления грунта.



Энергия через ОПН  
на опоре О2 для фронта 1/100 мкс

Энергия через ОПН  
на опоре О2 для фронта 5/100 мкс



Энергия через ОПН на опоре О2 для фронта 10/100 мкс

Рис. 3. Зависимость энергии, выделяемой в ОПН на пораженной цепи, от амплитуды тока молнии (для ВЛ с 9 изоляторами в гирлянде)

Fig. 3. Surge arrester discharge energy as a function of the lightning current magnitude for the struck circuit (for 9 insulators in the string)

Таким образом, влияние величины фронта на энергию наиболее выражено для малых значений удельного сопротивления грунта и сопротивления ЗУ опор. После перекрытия изоляции ВЛ влияние величины сопротивления ЗУ минимально.

Аналогичные расчеты были проведены для ВЛ 110 кВ с девятью изоляторами в гирлянде. Увеличение электрической прочности линейной изоляции напрямую способствует снижению количества перекрытий, вызванных ударом молнии. Это в свою очередь приводит к увеличению энергетических нагрузок на ОПН. Таким образом расширяется диапазон опасных сочетаний фронт/амплитуда импульса тока молнии при которых может произойти повреждение ограничителя.

На рис. 3 представлены зависимости энергии для одинаковых фронтов, но разных сопротивлений.

Таким образом при благоприятном сочетании условий эксплуатации ВЛ (малое удельное сопротивление грунта) и характеристик импульса тока молнии наблюдается превышение допусти-

мой энергии для ОПН 3-го класса пропускной способности. Чем выше электрическая прочность линейной изоляции, тем больше вероятность появления такого сочетания характеристик импульса и сопротивления ЗУ опор, при котором будет поврежден ОПН.

При тяжелых условиях эксплуатации ВЛ (высокое удельное сопротивление грунта), повреждение рассматриваемого ОПН вследствие превышения допустимой энергии возможно только при высоких значениях амплитуды импульса тока молнии (значение варьируется в зависимости от характеристик импульса, электрической прочности изоляции и сопротивления ЗУ опор).

### Установка дополнительных ОПН

Общий подход к выбору схемы защиты основывается на технико-экономическом сравнении различных вариантов. В конечном счете, выбор той или иной схемы защиты представляет собой компромисс между надежностью защиты, с одной стороны, и затратами на ее реализацию, с другой стороны [14].

Для защиты ВЛ от обратных перекрытий в случае высокого сопротивления ЗУ опор наиболее распространенной является установка дополнительных ОПН на нижних фазах [15, 16]. Рассмотрим такой вариант схемы расстановки применительно к нашему случаю (рис. 4).

Так как с точки зрения энергоемкости ОПН наиболее тяжелые условия наблюдаются на ВЛ с усиленной изоляцией, то в дальнейшем будем рассматривать линию с гирляндами из 9 изоляторов.

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты расчетов с двумя схемами расстановки ОПН для импульсов тока молнии с фронтами 1 и 10 мкс и сопротивлением ЗУ опор 30 Ом.

Таким образом установка дополнительных ОПН на нижние фазы не вносит существенного влияния на энергетическую нагрузку ОПН на верхних фазах при ударе молнии в провод. Во-первых, защита нижних фаз опор по краям пролета без троса не влияет на защищенность верхних фаз соседних опор, в следствии перекрытия которых уменьшается энергия, рассеиваемая ОПН. Во-вторых, участие ОПН нижних фаз в распределении энергии между аппаратами незначительно из-за большого волнового сопротивления провода, как и в случае ОПН на соседней цепи, описанном выше. Эти условия приводят к слабому влиянию данной расстановки ОПН на энергетическую нагрузку ОПН верхних фаз.

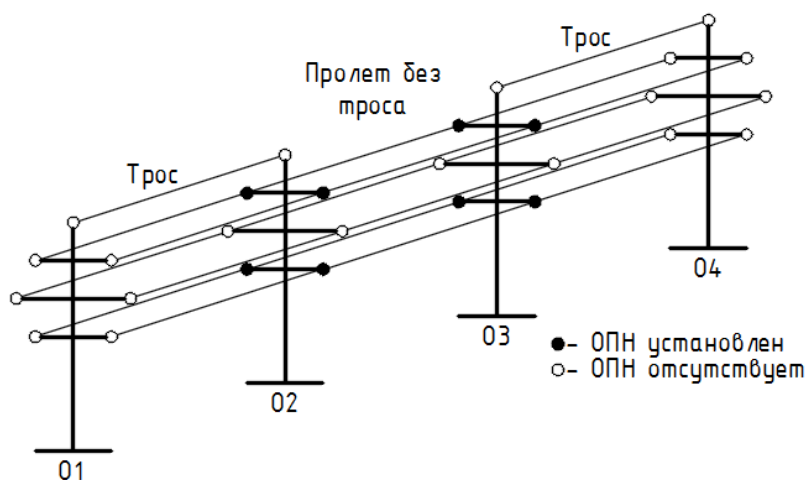
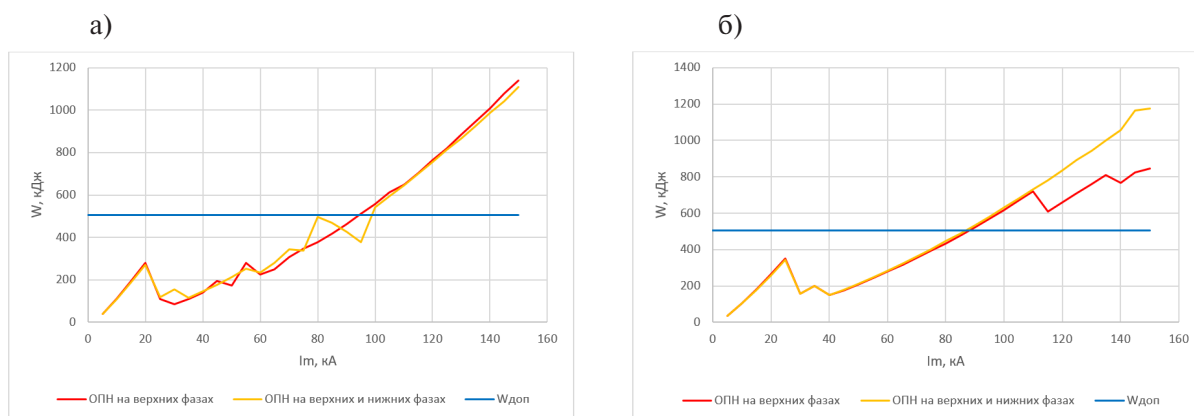


Рис. 4. Схема исследуемой ВЛ 110 кВ с ОПН на верхних и нижних фазах  
 Fig. 4. Model of 110 kV transmission line with additional surge arresters



Энергия через ОПН верхней фазы на опоре О2 для фронта 1/100 мкс

Энергия через ОПН верхней фазы на опоре О2 для фронта 10/100 мкс

Рис. 5. Зависимость энергии, выделяемой в ОПН на пораженной цепи, от амплитуды тока молнии (9 изоляторов). ОПН на верхних и нижних фазах

Fig. 5. Surge arrester discharge energy as a function of the lightning current magnitude for the struck circuit (for 9 insulators in the string). Surge arresters in the upper and lower phases

При использовании данной схемы расстановки для ВЛ с малым сопротивлением ЗУ опор «зубчатый» характер роста энергии сохраняется и не имеет значительных расхождений по форме с результатами, полученными ранее.

### Выводы

С точки зрения энергетических характеристик удар молнии в фазный провод является тяжелым случаем для ОПН.

Установка ОПН на верхних фазах крайних опор пролета не способна обеспечить надежную эксплуатацию ВЛ в случае удара молнии в бестросовый пролет.

Влияние величины фронта на энергию наиболее выражено для малых значений удельного сопротивления грунта и сопротивления ЗУ опор.

Выявлена возможность повреждения ОПН 3-го класса пропускной способности вследствие превышения допустимой энергии, особенно при малом удельном сопротивлении грунта, когда перекрытие изоляции происходит только при больших токах молнии. Чем выше электрическая прочность линейной изоляции, тем больше вероятность появления такого сочетания характеристик импульса тока молнии и сопротивления ЗУ опор, при котором будет поврежден ОПН.

При высоком удельном сопротивлении грунта, повреждение рассматриваемого ОПН вследствие превышения допустимой энергии возможно только при высоких значениях амплитуды импульса тока молнии.

Установка дополнительных ОПН на нижние фазы не вносит существенного влияния на энергетическую нагрузку ОПН на верхних фазах при ударе молнии в провод.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. СПб: Издательство Политехнического университета, 2011. 369 с.

- [2] **Халилов Ф.Х., Котляров Э.Р.** Отказ от тросовых молниеотводов и трубчатых разрядников на воздушных линиях 35-150 кВ в районах Крайнего Севера // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2015. № 2(219). С. 41–47.
- [3] **Nor Hassan N.H., Abu Bakar A.H., Ilias H.A., Abd Halim S., Mokhlis H., Terzija V.** Analysis of discharge energy on surge arrester configurations in 132 kV double circuit transmission lines // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2019. (139). P. 103–111.
- [4] **Banjanin M.** Line arresters and underbuilt wire application in lightning protection of 110 kV and 220 kV overhead transmission lines // 2019 18<sup>th</sup> International Symposium INFOTEN-JAHORINA, INFOTEN 2019 – Proceedings. 2019. P. 20–22.
- [5] **Visacro S., Silveira F.H., Vale M.H.M., Pomar G.D.** Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures // Electric Power Systems Research. 2021. № 195. P. 1–6.
- [6] **Banjanin M.S.** Application possibilities of special lightning protection systems of overhead distribution and transmission lines // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018. № 100. P. 482–488.
- [7] **Visacro S., Silveira F.H., Pereira B., Gomes R.M.** Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines // Electric Power Systems Research. 2020. № 180. P. 1–7.
- [8] **Гилязов М.З., Матвеев Д.А.** Методические аспекты оценки эффективности применения ОПН для повышения грозоупорности ВЛ // III Российская конференция по молниезащите. 2012. С. 1–12.
- [9] **Механошин Б.И., Богданова О.И., Гилязов М.З., Матвеев Д.А.** Комплексный подход к обеспечению грозоупорности ВЛ // III Российская конференция по молниезащите. 2012. С. 1–6.
- [10] **Кемпонен М.Э., Панов А.В., Колычев А.В., Гулов А.М., Лопатин В.** Опыт применения линейных ОПН — разрядников для защиты линейной изоляции ВЛ 110 кВ. Исследование энергетических характеристик разрядников // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4 (67). С. 42–46.
- [11] **Hayashi T., Mizuno Y., Naito K.** Study on transmission-line arresters for tower with high footing resistance // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. № 4(23). С. 2456–2460.
- [12] **Косоруков А.В., Колычев А.В., Гумерова Н.И., Хохлов Г.Г.** Расчет грозоупорности воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше // III Российская конференция по молниезащите. 2012. С. 1–8.
- [13] **Xia Q., Karady G.** An efficient surge arrester placement strategy to improve the lightning performance of long transmission line // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2020. P. 1–5.
- [14] **Гайворонский А.С.** Новые технологии грозозащиты ВЛ 220-500 кВ с применением линейных разрядников // Современное состояние эксплуатации проектирования и строительства ВЛ. 2010. С. 176–190.
- [15] **Матвеев Д.А., Гилязов М.З.** Расчетное определение оптимальных схем расстановки ограничителей перенапряжений на одно- и двухцепных воздушных линиях электропередачи 110 кВ // Энергетик. 2012. № 6. С. 15–19.
- [16] **Zhou L., Wu T., Wang D., Hu C., Chen S.** Research on Optimal Configuration of Line Lightning Arrester Considering Terrain and Flashover Cost // 2021 IEEE 2<sup>nd</sup> China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021. 2021. P. 1–5.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГУЛОВ Александр Михайлович** — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.  
E-mail: algu1ov@yandex.ru



**КОЛЫЧЕВ Александр Валерьевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: alkoly4ev@yandex.ru

**КОСОРУКОВ Антон Владимирович** – нач. электролаборатории, АО «Ленгидропроект», канд. техн. наук.

E-mail: kosorukovav@lhp.ru

## REFERENCES

- [1] **N.I. Gumerova, A.V. Kolychev, F.Kh. Khalilov**, Molniyezashchita elektricheskikh setey srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya (Lightning protection of electrical networks of medium, high and ultra-high voltage). SPb: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2011. 369 с.
- [2] **F.Kh. Khalilov, E.R. Kotlyarov**, Otkaz ot trosovykh molniyeotvodov i trubchatykh razryadnikov na vozduzhnykh liniyakh 35-150 kV v rayonakh Kraynego Severa (Avoiding the use of protection wire and tubular rods of 35-150 kV for lightning protection of overhead power lines and substations in conditions of Far North) // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2015. № 2(219). S. 41–47.
- [3] **N.H. Nor Hassan, A.H. Abu Bakar, H.A. Illias, S. Abd Halim, H. Mokhlis, V. Terzija**, Analysis of discharge energy on surge arrester configurations in 132 kV double circuit transmission lines // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2019. (139). P. 103–111.
- [4] **M. Banjanin**, Line arresters and underbuilt wire application in lightning protection of 110 kV and 220 kV overhead transmission lines // 2019 18<sup>th</sup> International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2019 – Proceedings. 2019. P. 20–22.
- [5] **S. Visacro, F.H. Silveira, M.H.M. Vale, G.D. Pomar**, Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures // Electric Power Systems Research. 2021. № 195. P. 1–6.
- [6] **M.S. Banjanin**, Application possibilities of special lightning protection systems of overhead distribution and transmission lines // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018. № 100. P. 482–488.
- [7] **S. Visacro, F.H. Silveira, B. Pereira, R.M. Gomes**, Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines // Electric Power Systems Research. 2020. № 180. P. 1–7.
- [8] **M.Z. Gilyazov, D.A. Matveyev**, Metodicheskiye aspekty otsenki effektivnosti primeneniya OPN dlya povysheniya grozoupornosti VL (Methodological aspects of assessing the effectiveness of the use of surge arresters to increase the lightning resistance of overhead lines) // III Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. 2012. S. 1–12.
- [9] **B.I. Mekhanoshin, O.I. Bogdanova, M.Z. Gilyazov, D.A. Matveyev**, Kompleksnyy podkhod k obespecheniyu grozoupornosti VL (An integrated approach to ensuring lightning resistance of overhead lines) // III Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. 2012. S. 1–6.
- [10] **M.E. Kemponen, A.V. Panov, A.V. Kolychev, A.M. Gulov, V. Lopatin**, Opyt primeneniya lineynykh OPN – razryadnikov dlya zashchity lineynoy izolyatsii VL 110 kV. Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik razryadnikov (Experience in the use of linear surge arresters to protect the linear insulation of 110 kV overhead lines. Research on energy characteristics of surge arresters) // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2021. № 4 (67). S. 42–46.
- [11] **T. Hayashi, Y. Mizuno, K. Naito**, Study on transmission-line arresters for tower with high footing resistance // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. № 4 (23). S. 2456–2460.
- [12] **A.V. Kosorukov, A.V. Kolychev, N.I. Gumerova, G.G. Khokhlov**, Raschet grozoupornosti vozduzhnykh liniy elektroperedachi 110 kV i vyshe (Calculation of lightning resistance of overhead power transmission lines 110 kV and above) // III Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. 2012. S. 1–8.

[13] **Q. Xia, G. Karady**, An efficient surge arrester placement strategy to improve the lightning performance of long transmission line // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2020. P. 1–5.

[14] **A.S. Gayvoronskiy**, Novyye tekhnologii grozozashchity VL 220-500 kV s primeneniym lineynykh razryadnikov (New technologies of lightning protection of 220-500 kV overhead lines with the use of surge arresters) // Sovremennoye sostoyaniye ekspluatatsii proyektirovaniya i stroitelstva VL. 2010. S. 176–190.

[15] **D.A. Matveyev, M.Z. Gilyazov**, Raschetnoye opredeleniye optimalnykh skhem rasstanovki ogranichiteley perenapryazheniy na odno- i dvukhtsepykh vozdushnykh liniyakh elektroperedachi 110 kV (Calculated determination of optimal schemes for placement of surge arresters on single- and double-circuit overhead power lines of 110 kV) // Energetik. 2012. № 6. S. 15–19.

[16] **L. Zhou, T. Wu, D. Wang, C. Hu, S. Chen**, Research on Optimal Configuration of Line Lightning Arrester Considering Terrain and Flashover Cost // 2021 IEEE 2<sup>nd</sup> China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021. 2021. P. 1–5.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexander M. GULOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: [algu1ov@yandex.ru](mailto:algu1ov@yandex.ru)

**Alexander V. KOLYCHEV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: [alkoly4ev@yandex.ru](mailto:alkoly4ev@yandex.ru)

**Anton V. KOSORUKOV** – *JSC «Lenhydroproject»*.  
E-mail: [kosorukovav@lhp.ru](mailto:kosorukovav@lhp.ru)

Поступила: 30.07.2022; Одобрена: 05.09.2022; Принята: 20.09.2022.  
Submitted: 30.07.2022; Approved: 05.09.2022; Accepted: 20.09.2022.